

# 一番星へ行こう！

## 日本の金星探査機の挑戦 その22

### ～米国航空宇宙局深宇宙ネットワークの活躍と貢献～

戸田 知朗<sup>1</sup>，あかつきプロジェクトチーム

(要旨) 「あかつき」の長い旅路に寄り添ってきたのは、臼田宇宙空間観測所ばかりではない。米国航空宇宙局深宇宙ネットワーク (NASA Deep Space Network) という頼もしい仲間が、打上げから、金星軌道投入へ向けた軌道修正、そして軌道投入失敗の時も、その直後の「あかつき」探索も常に支えてきてくれた。「あかつき」に限らずNASA DSN支援は、我が国の深宇宙探査プログラムに深く結びついて、今では欠かせない要素である。「あかつき」の重要な運用局面に常にあったこのDSN支援を解説すると共に、翻って我が国の地上局のあり方とその将来についても議論することとしたい。そこには、DSNなしには成り立たない我が国の探査の限界も見えてくるはずである。

## 1. 深宇宙ネットワーク

我が国の深宇宙地上局は、言わずと知れた臼田宇宙空間観測所 (UDSC : Usuda Deep Space Center) である。「さきがけ」, 「すいせい」を駆ったハレー彗星探査以来、四半世紀に渡って日本の探査を支えてきた。その口径64 mのアンテナと通信設備は、単局の性能として今も色褪せない。しかし、時代はネットワークである。すなわち、世界規模で深宇宙局を展開し、24時間、探査機の一挙手一投足を見張る深宇宙ネットワーク (DSN : Deep Space Network) でこそ極限の探査が可能になる。

米国航空宇宙局 (NASA : National Aeronautics and Space Administration) は早くからDSN整備に着手し、その成果は日本の探査機をも存分に支えてきた。現在も、その規模は口径34 mの地上局を中心に発展している。欧州宇宙機関 (ESA : European Space Agency) もまた、遅ればせなら2013年、自前のDSNの完成を見た。これら2機関は地上運用も含めて独自に深宇宙探査遂行を完結する力を有すると同時に、DSNの相互利用について積極的な関係を築き始めている。



図1：臼田宇宙空間観測所と米国航空宇宙局深宇宙ネットワーク3拠点の位置関係。

図1に、UDSCとNASA DSNの位置関係を示した。NASA DSNはGoldstone (北米), Canberra (豪州), Madrid (欧州)の3拠点からなり、それぞれはコンプレックスと呼ばれ、複数の深宇宙局をその内に擁して複雑な運用を展開している。同時に複数の探査機を追尾できるのは当然ながら、1つの探査機に対し複数局における受信信号を合成加算することも、コンプレックス間の基線を用いて探査機の位置決定を行うこともできる。ネットワークの威力は、単に地球をぐるりと可視時間を延長するだけではない。ESAもNASA DSNほどではないにしても、Cebreros (欧州), New Norcia (豪州), Malargue (南米)の3拠点に口径35 mの地

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所  
toda.tomoaki@jaxa.jp

上局を1局ずつ配備している。

UDSCしか自由にならない我が国の探査では、必然にNASA DSNの支援を仰ぐことになってきた。「はやぶさ」は我が国独自の探査に違いないが、その成功はDSN支援なしにはありえなかった。黎明期のようにフライバイをこなす程度のミッションであればUDSC単独で十分であったが、残念ながら単独局だけでその先の探査活動に挑むことは難しい。「はやぶさ」だけでなく、「あかつき」も因らずもその難しさに直面してしまった[1]。金星軌道投入という運用を控えて、NASA DSNの支援を必須と考えていたわけだが、正しくその通りだった。軌道投入に必要な精緻な軌道決定には、Differential One Way Range(DDOR)と呼ばれる先述のコンプレックス間基線を利用した位置決定技術が欠かせない。また、軌道投入前後にUDSCから非可視となる時間が不可避で、投入準備、投入異常時の救済対応など、「あかつき」の不測の事態に備える唯一の手段だった。

## 2. 深宇宙ネットワーク支援の始まるまで

深宇宙ネットワークの使用を確実なものとするため、どのミッションにおいても探査機側の通信装置とNASA DSNの通信装置を接続する試験を、打上げ以前に(通常は、搭載通信装置フライトモデル開発に先

行して)完了させたい。また、NASA DSNの地上局と探査機地上運用装置間のデータ伝送の授受も、上記の接続試験に合わせて、さながら探査機がNASA DSNの先にあるかのように模擬した条件で実施したい。実際には、探査機側の開発速度に加え、機関間の調整に時間を要するのが原因で、この通り首尾よく運ぶことは少ない。「あかつき」もまた、打上げの約半年前にようやく、この適合性試験にこぎ着けた。

適合性試験の実施に必要な項目を表1にまとめた。全てのミッションにおいて、この内容を覆うように試験期間に応じて詳細項目の分量が絞られていく。「あかつき」の場合、2009年12月7日～12月11日の5日間の内に、NASA DSN専用の試験拠点で予定した計測を行った。「あかつき」からは新しいX帯搭載通信装置(X帯は電波の周波数帯を指す)が採用されたのだが、宇宙データシステム諮問委員会における宇宙通信方式の国際標準化のおかげでUDSC通信装置をほぼ標準装置と見なせ、事前に疎通確認を行っていたため、打上げ半年前の試験といえども大きな不安は無かったといえる。試験拠点と国内地上運用センター間の接続性も、先行ミッションであった「はやぶさ」で十分経験が積まれていたため、大きな混乱は無かった。この後、NASA DSN各局と国内地上運用センター間の実際的な回線接続試験(Ground Data System Testと呼ばれる)が順次実施されていく。最終的に、打上げ手順に

表1：適合性試験に必要な手続き。

項目	目的
試験装置輸出手続き	試験装置の米国への移送
試験内容調整	試験手順書の作成
代表的な試験項目	
疎通試験	探査機-地上局間の接続性の確認
コマンド特性	
到達率の計測	回線予測との合致
テレメトリ特性	
受信閾値の計測	回線予測との合致
測距特性	
遅延時間の計測	測距計測の条件確認
DDOR 信号特性の計測	DDOR 計測の条件確認
データ伝送	探査機-国内地上運用センター間の接続性確認

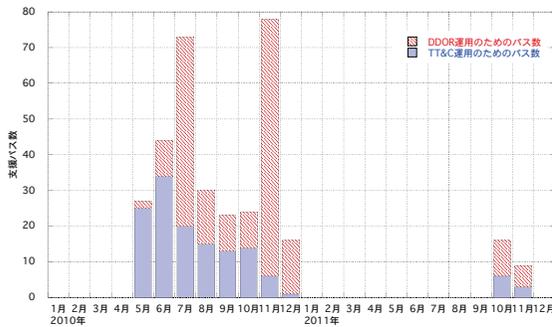


図2：可視(パス)数による「あかつき」への深宇宙ネットワーク支援の実績。

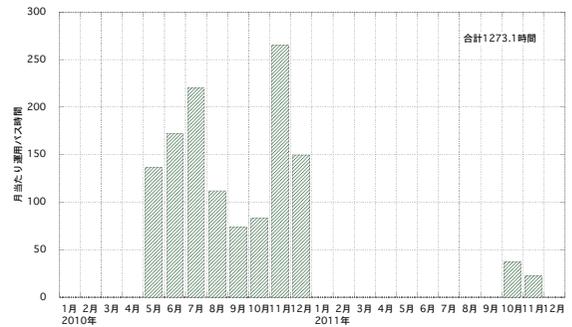


図3：運用時間による「あかつき」への深宇宙ネットワーク支援の実績。

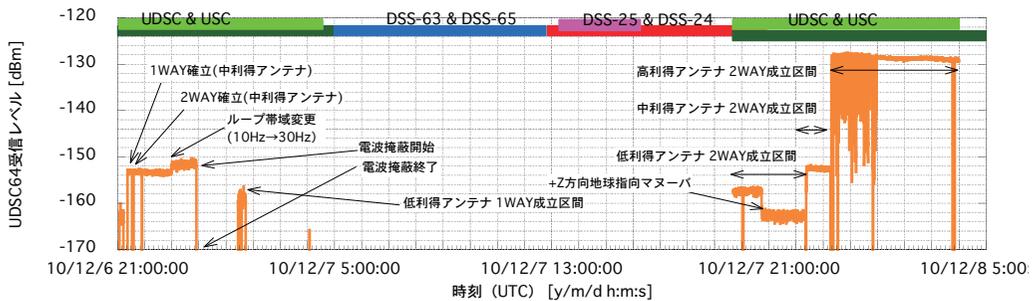


図4：金星軌道投入時の地上局支援と臼田宇宙空間観測所の受信レベル履歴。

沿った「あかつき」の全体試験手順の中において、NASA DSNとの間で打上げ時と変わらぬ条件でのリハーサル(End-to-End Test)を行い、NASA DSN側の審査(Mission Event Readiness Test Reviewという)を経て打上げに備えることとなる。

NASA DSN側との最終調整としては、天候や機体(ロケット、探査機)の状況によって打上げ時刻や期日が順延した場合の対応を考えねばならない。予め、天候を理由とする順延の場合のシナリオまで決めてあるが、それ以上の遅延を招く場合には、NASA DSN側の地上局確保の調整が喫緊となる。「あかつき」では、打上げ順延が1日生じたが、これは前もって想定したシナリオで吸収されて、新たな打上げ期日での対応は問題なくこなされた。

### 3. 深宇宙ネットワークの活躍

図2と図3に、これまでのNASA DSN使用実績をまとめた。図2は可視運用(パス)の数によって、図3は運用の目的を区別しない総運用時間(地上送信機

ONからOFFまでの時間)によってまとめたものである。横軸は協定世界時に合わせて計数した。

「あかつき」打上げは協定世界時で2010年5月20日であり、最初にNASA DSN Goldstone Complexであかつきの産声を(電波ゆえに耳ではなく)目にする手はずであった。図4は、太陽捕捉後のスピンによって規則的に変動する「あかつき」の受信信号を捕らえたNASA DSNからの報告である。図2と図3には、6月までTT&C(Telemetry, Tracking & Command)を中心とした探査機立ち上げのための支援を、NASA DSNから継続して受けた様子が現れている。7月以降は、DDOR運用のためのパスが増加し、2010年12月の金星軌道投入へ向けた軌道決定のための支援へシフトした様子が顕著である。7月以降は、探査機を姿勢(向き)も含めて静置して擾乱のなるべく少ない状態を作るなど、精密な軌道決定のための補正データ取得が重点的に行われた時期でもあり、DDOR運用頻度が急増している。また、軌道投入直前の11月は最終的な金星軌道への進入路を決めるために、やはり重点的にNASA DSN支援を活用していた。



図5：金星軌道再投入時における白田宇宙空間観測所のコマンド回線予測。



図6：金星軌道再投入時における白田宇宙空間観測所のテレメトリ回線予測。

「あかつき」にとって問題の金星軌道投入であるが、図4は投入前後でのUDSCにおける受信レベルの推移を表している。電波掩蔽による通信不可帯を抜けて再び信号を地上で捕捉する計画だったが、電波掩蔽終了後も信号が見えていない。これが軌道投入失敗である。その後、間もなく短時間、信号を発見できたが再び見失ってしまった。この後にDSS-63、DSS-65、DSS-25、DSS-24とあるのは、「あかつき」探索に投入されたNASA DSNの地上局である。DSS-63とDSS65は、Madrid Complex内の2局であり、DSS-24とDSS-25はGoldstone Complex内の2局である。DSS-63とDSS-65は、当初から異常時に備えて配備されていた局であるが、その後のGoldstone Complexとの継続性を考えて運用時間をぎりぎりまで延長して支援を受けた。このMadrid Complexでの探索によって「あかつき」の微弱な信号が見つかり、その後のGoldstone Complexでの追跡によって軌道決定までもが可能となり、翌日のUDSC可視における確実な「あかつき」捕捉に繋がった。明らかに、NASA DSN支援がなければ、翌UDSC可視で更に位置誤差の増した条件で、「あかつき」の電波探索から始めなければならなかった。例え、「あかつき」信号を見出せても、安定した運用を再開するための軌道決定には更に時間を要しただろう。その間に適切な姿勢を保持できず、観測機器などは致命的な故

障を被る可能性もある。「あかつき」の事故原因の究明が成ったのも、早々の復旧によって搭載保存データをいち早く地上に降ろせたことによる。探査機の位置喪失からの復旧は、人命救助同様、早期発見が鉄則であり、NASA DSN支援の貢献は絶大なものであった。NASA DSN支援がなければ、既に探査機を失っていたかもしれない。

「あかつき」は幸い、図2と図3が示すように、2011年10月と11月の軌道修正(これもまた、NASA DSNによる軌道決定支援を受けた)を経て、金星へ向かう軌道に無事乗っている。いよいよ金星再軌道投入である。

#### 4. 深宇宙ネットワーク支援の今後

「あかつき」の金星再軌道投入の計画が明らかになりつつある[2]。この計画に基づいてUDSCから運用する場合の回線評価結果が図5と図6である。図5にコマンド回線(地上局から探査機)、図6にテレメトリ回線(探査機から地上局)をまとめてある。横軸は、2014年4月から始まる協定世界時である。

「あかつき」には様々なアンテナが目的をもって搭載されているが、目下、主力となっているのは中利得アンテナ(MGA: Medium Gain Antenna)である。こ

これは1軸ジンバルに乗った矩形ホーンアンテナであり、「あかつき」の太陽電池パドルを通る軸が軌道面あるいは太陽-金星-地球を含む面に垂直である限りは、ジンバル駆動によってアンテナを地球方向へ向けることで一定の回線を期待できる。中利得アンテナは2台あり、互いに逆方向を向いてパドルの周囲360°に対応できる。図5から、中利得アンテナを適切に選択すればコマンド回線は常時確保可能であると分かるが、図6のようにテレメトリ回線の確保は難しい。ほとんどの期間でデータレートは512bps(bit per second)以下となって、軌道投入運用の結果分析に必要なテレメトリデータは選別しなければ入手困難である。このような状況にも、NASA DSN支援を受けて可視時間を延長することが非常に効果的といえる。

軌道投入後半、2016年頭に多く現れるデータレートの断続(グラフ上は縦線に見える)は、金星掩蔽による通信の遮断を表している。これらは1日を越えることはなく1次的な遮断であるが、異常時対応には障害となる可能性が大きく、この場合も時間差によるNASA DSN支援での可視時間確保が有効である。2010年の軌道投入では、事前の軌道決定と異常後の救済作業にNASA DSNの貢献があったことを述べたが、このように次回投入時はデータ収集の点でもNASA DSNの支援への期待が大きい。

## 5. 我が国の深宇宙局のこれから

深宇宙局を始め地上局はインフラに分類されている。これは射点の打上げ設備などと同じ分類だが、開発側の意識は大分違っている。探査機の打上げから運用までの流れを追うと(これは、技術開発の順序そのものでもある)、ロケットとそれに付随する打上げ設備の整備がまず行われ、次いで探査機や衛星の開発へ広がっていく。最下流の地上局の開発は常に最も後発である。欧米の組織や人材の現状を知れば、この傾斜は技術の成熟と共に解消していくかに見えるが、国内では依然として強い根を張っている。残念ながら、海外機関との比較において、国内は地上局の能力の重要性に最も疎いかもかもしれない。既に建設から四半世紀を過ぎた現行のUDSCと対になり、またそれを後継していく深宇宙局の整備は探査活動の継続のために急務であるが、一向に動きが見えないままである。

海外機関での深宇宙ネットワーク展開の背景には、Ka帯採用の流れもある。Ka帯は現状のX帯より高い周波数の利用を目指すもので、地上局はこれによって64 mより小口径でありながら、64 mと同当の回線品質を潜在的に確保できる。潜在的に、というのは、運用技術、つまり使いこなす技術がまだまだ必要とされる発展途上の技術だからである。我が国も「はやぶさ2」の搭載側でKa帯を採用したが、先述のように白田後継の議論は空転していて、Ka帯に対応する地上局の見通しは立っていない。そのような状況では、やはり海外機関の地上局の支援を頼みにするしかない。Ka帯運用の機会はNASA DSNにおいてもまだ貴重で、貴重な運用データをただ海外機関向けに提供するようなものである。

我が国のあるべき深宇宙局としては、海外機関の衛星、探査機に比べて小さく、とかく搭載資源が限られて搭載通信能力も当然に抑制せねばならない、そんな国内探査機の劣勢な能力を十分補強できるものでありたい。UDSCは、これをよく見通して四半世紀に通用する設計であった。このような地上局の能力は当然ながら、海外機関に運用を100%依存したり、海外機関と同じ地上局一式をそのまま購入したりすることで獲得できはしない。もしこのような後継局を持ってない将来が来るとしたら、それはロケットにしる、探査機にしる、埋め合わせのために今ある以上に開発規模を拡大して、欧米並みに大型ミッションを推進していくことを期待しなければならないが、イブシロンロケットを中心に小型衛星による科学探査の前途を切り拓こうとする宇宙科学ロードマップ[3]の志向とは明らかに矛盾している。我が国の探査は、このような矛盾にどこまで耐えていけるのだろうか？

## 参考文献

- [1] 中村正人, 遊星人 20, 1, 68.
- [2] Chikako, H. et al., 2012, 23rd International Symposium on Space Flight Dynamics.
- [3] 「宇宙科学・探査ロードマップについて」, 第7回宇宙科学探査部会資料.